



## شیل گاز منبع انرژی آینده: اکتشاف و ارزیابی

خبراله اصغری<sup>۱</sup> ■ مدیر فنی پروژه ونزوئلا - شرکت پتروپارس  
 فهیمه شکرانه<sup>۲</sup> ■ کارشناس ارشد زمین شناسی نفت - شرکت مشاوران انرژی تهران  
 علی کلاهدوز<sup>۳</sup> ■ کارشناس ارشد زمین شناسی - شرکت پتروپارس

### مقدمه

شیل گازدار گروهی از سنگهای رسی فشرده تیره رنگ حاوی مواد غنی هیدروکربوری از نوع گاز است که به دلیل داشتن تراوایی کم، مانع از جریان یافتن مناسب گاز به داخل چاه‌های تولیدی می‌شود. این منابع که به دلیل داشتن مواد آلی بالا به عنوان سنگ مادر در یک سیستم نفتی محسوب می‌شوند، اگر به درجه اشباع هیدروکربوری رسیده باشند و زایش گاز درجا در آنها صورت گرفته باشد، گزینه بسیار مناسبی برای تولید گاز طبیعی به شمار می‌روند.

در حدود پیش از ۲۰۰ سال است که تولید گاز از مخازن شیل‌های گازی در آمریکا آغاز شده است. این نوع مخازن در آمریکا شامل مخازن توسعه یافته و مخازن اکتشاف نشده گسترده می‌باشند. حجم ذخایر شیل گازی در آمریکا در حدود ۵۰۰ تا ۷۸۰ تریلیون فوت مکعب برآورد می‌گردد. کارشناسان معتقدند که ذخایر شیل گاز و نفت آمریکا این پتانسیل را دارد که ایالات متحده را در ۴۰ سال آینده به قله تولید جهانی نفت در جهان سوق دهد. منابع گاز طبیعی غیرمتعارف، ماسه‌های

گازی متراکم، شیل‌های گازی دارای شکستگی طبیعی و مخازن متان ذغال‌دار درصد قابل توجهی از منابع گاز طبیعی شمال آمریکا را تشکیل می‌دهند که یک منبع مهم برای رشد و تولید ذخایر آینده به شمار می‌روند. همانند سیستم‌های هیدروکربن متعارف، مخازن گازی غیرمتعارف با سیستم‌های پیچیده پتروفیزیکی و زمین‌شناسی در تمام مقیاس‌ها مشخص می‌گردند. با وجود این، بر خلاف مخازن متعارف، مخازن گازی غیرمتعارف، خصوصیات جریان که به طور منحصر به فرد به زمین‌شناسی، رسوب‌گذاری و فرایندهای دیاژنتیک وابسته است را نشان می‌دهد.

پارامترهای کلیدی مخازن شیل‌های گازی عبارتند از:

۱. بلوغ حرارتی
۲. ضخامت لایه‌های مخزنی
۳. میزان کل محتویات کربنی<sup>۴</sup>
۴. میزان گاز جذب شده بر روی سطح سنگ<sup>۵</sup>
۵. میزان گاز آزاد در فضای متخلخل و در شکاف‌ها
۶. خواص ژئومکانیکی سنگ (قابلیت

ایجاد شکاف هیدرولیکی) مخازن شیل‌های گازی باید دارای حجم سنگ مناسب، مواد ارگانیک کافی و بلوغ حرارتی مناسب برای تولید هیدروکربور خصوصاً گاز باشند. اولین قدم در ارزیابی این نوع مخازن، تشخیص پتانسیل مخزن شیل-گازی بودن آنها است. مخازن شیل‌های گازی از نظر میزان تخلخل، کانی‌شناسی، تراوایی، میزان محتوای گاز و فشار بسیار متفاوت هستند. گاز در این نوع مخازن به دو صورت گاز آزاد در فضای متخلخل و شکاف‌ها و همچنین گاز جذب شده بر روی مواد ارگانیک وجود دارد. یک بسته نرم‌افزاری کامل با استفاده از پلاتفرم Express شرکت شلمبرژه و ابزار نمودارگیری<sup>۶</sup> ECS برای ارزیابی شیل‌های گازی توسعه یافته است. از آنجایی که ECS امکان بررسی میزان گاما را مستقل از محتوای حجم شیل و دانسیته سنگ زمینه بدست می‌دهد، ابزار مناسبی برای ارزیابی تغییر لیتولوژی در مخازن شیل گاز به حساب می‌آید. برای ارزیابی مقدار کروژن، محاسبه اشباع گاز و میزان تخلخل، نرم‌افزار ELAN شلمبرژه به کار برده شد.

## ۱ - شاخصه‌های شیل‌های گازی

به طور کلی چهار نوع شیل گازی وجود دارد که از شیل‌های گازی از سنگ منشأ با بلوغ حرارتی مناسب در پنجره حرارتی گاز تا شیل‌های گازی از سنگ منشأ با بلوغ حرارتی نامناسب و تحت تاثیر فعالیت‌های باکتریایی (گاز بیوژنیک) متغیر است. کم‌ریسک‌ترین مخازن شیل‌گاز در مجاورت مخازن گازی معمولی قرار دارند.

مخازن شیل‌های گازی عموماً دارای میزان تخلخل ۴ تا ۶ واحد و میزان کل محتویات کربنی بزرگتر از ۴ درصد وزنی می‌باشند. شکل ۱ تقسیم‌بندی انواع مخازن غیرمتعارف را نشان می‌دهد.

با وجود شکاف‌ها در این نوع لایه‌ها، خواص سنگ در چنین محیط‌هایی و در مقیاس سیستم‌های تکمیل معمولی (در حدود ۱ کیلومتر) با تغییرات عمده‌ای همراه نیست اما باید در نظر داشت که تغییرات در ضخامت، کانی‌شناسی، بلوغ حرارتی و دیگر پارامترهای زمین‌شناسی / استراتیگرافی در فاصله‌های چند کیلومتری بر پتانسیل زایش گاز، توانایی ذخیره و تولید گاز تاثیر خواهد داشت. می‌توان نتیجه گرفت که در فاصله بین دو چاه امکان تغییر خواص سنگ، تغییرات در ضخامت لایه‌های مخزنی، کانی‌شناسی، بلوغ حرارتی و دیگر پارامترهای زمین‌شناسی / استراتیگرافی وجود دارد.

ارزیابی پتانسیل شیل‌گاز بودن، نیاز به درک ژئوشیمی شیل و خصوصاً دو پارامتر میزان کل محتویات کربنی و میزان بلوغ حرارتی آن دارد. میزان کل محتویات کربنی شاخصی از توان تولید گاز در شیل‌های گازی است. ترکیب مناسبی از این دو پارامتر می‌تواند در تشخیص ذخیره مناسب شیل‌گاز کمک مناسبی باشد.

میزان بلوغ حرارتی که پتانسیل تبدیل محتویات کربن ارگانیک شیل به هیدروکربن را نشان می‌دهد، با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های مغزه یا نمونه‌های خرده سنگ‌های بدست آمده در حین حفاری چاه و ضخامت لایه‌های مخزنی به راحتی با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی

قابل اندازه‌گیری است. همچنین نتایج آنالیز ژئوشیمیایی بر روی نمونه‌های خرده سنگ‌های بدست آمده از چاه‌های حفاری شده و یا نمونه‌های سطح‌الارضی، احتمال گازی بودن سنگ منشأ را نشان می‌دهند.

از نظر پتروفیزیکی و بر اساس پاسخ این نوع لیتولوژی در نمودارهای پتروفیزیکی، شیل‌های گازی باید دارای مشخصه‌های زیر باشند:

- میزان گامای بالا
- مقاومت بالا
- دانسیته کل پایین
- Pe پایین

این نوع پاسخ بر روی نمودارهای پتروفیزیکی به علت تمرکز بالای کروژن در شیل بوجود می‌آید. مقاومت بالای شیل در نمودارهای پتروفیزیکی به علت اشباع پایین آب (خصوصاً آب همزاد) است.

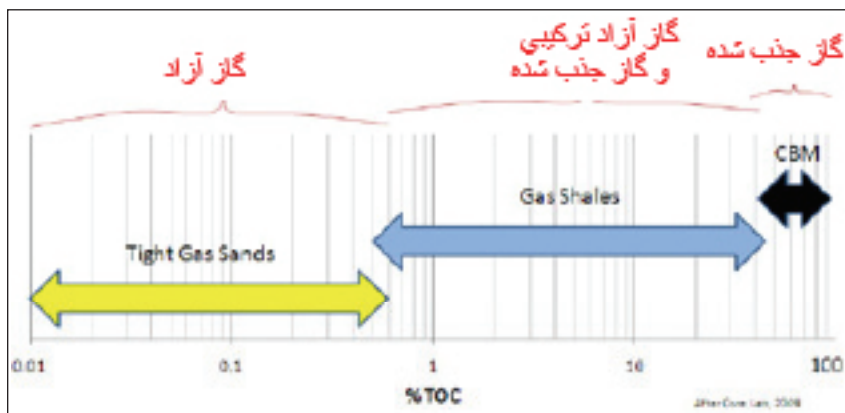
آنالیز استراتیگرافی حوضه‌های رسوبی مناطق مختلف نشان داده است که تولید گاز از منابع شیل‌های گازی عمدتاً در لایه‌های بلوغ یافته از نظر حرارتی و غنی از موجودات پلانکتونی که در سیستم تراکت‌های رسوبی پیشرونده<sup>۷</sup> نهشته شده‌اند، صورت می‌پذیرد که عموماً شیل‌های سیاه نامیده می‌شوند (هرچند ممکن است که میزان محتویات رسی کمتر از ۲۰ درصد باشد). وجود سیلیس و تاثیر فرآیند دیازنز، این نوع شیل‌ها را شکننده<sup>۸</sup> می‌نماید که برای انجام عملیات شکاف هیدرولیکی بسیار مناسب است. برای آگاهی از میزان رس موجود در این لایه‌ها (میزان رس بالاتر منجر به کاهش

شکنندگی لایه‌های شیل می‌گردد)، آنالیز کانی‌شناسی نمونه خرده سنگ‌های بدست آمده از چاه‌های حفاری شده ضروری است.

## ۲ - ارزیابی کروژن و میزان کل محتویات کربنی

میزان گاز تابعی از محتوای کروژن، فشار منفذی و دما است. تعیین کمیت محتوای کروژن به طور مشخص به عنوان TOC تعریف می‌شود که یک مرحله ضروری در ارزیابی شیل‌گاز است. مقالات متعددی در مورد کاربرد نمودارهای چاه‌پیمایی متعارف جهت ارزیابی و تعیین کمیت کروژن در شیل‌ها هم به عنوان سنگ منشأ و هم پتانسیل مخزن وجود دارد. اغلب محاسبات عددی معمول بر نمودار دانسیته یا صوتی جهت تفکیک کروژن تکیه دارد. بنابراین هر دو نیازمند یک تخمین دقیق از خصوصیات ماتریکس هستند. این کار احتمالاً به دلیل متنوع بودن کانی‌های غیررسی شیل‌های گازی (برای مثال کانیهای پیریت و غلظت کلسیت) مشکل است. به علاوه، این ابزار فقط محتوای کروژن را تعیین می‌نماید. آن را به TOC تبدیل نکرده و یا گاز جذب شده را محاسبه نمی‌کند.

ویژگی قابل توجه دیگر، محتوای کانی رسی شیل‌ها است. مقدار رس در شیل، بسته به انواع مختلف کانی‌های رسی موجود و تغییر در خصوصیات کلیدی پتروفیزیکی در انواع رس‌ها (برای مثال فعالیت پرتوگاما، تخلخل نوترون و کاهش سرعت نوترون)، می‌تواند



۱ | انواع مخازن گازی غیر متعارف بر اساس میزان کل محتویات کربنی



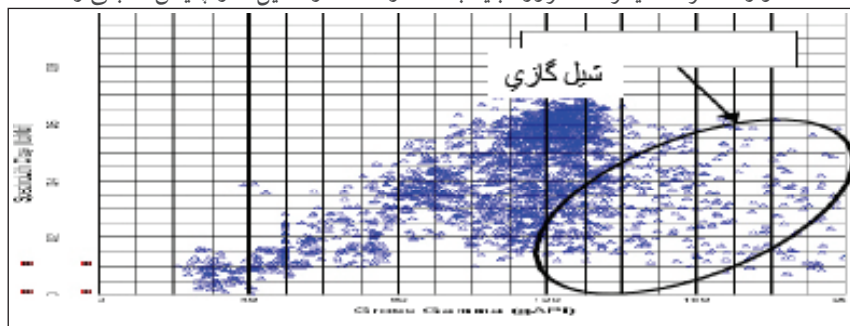
گیج کننده باشد. شکل ۲ نمودار متقاطع فعالیت پرتو گاما در مقابل محتوای رس یک نمونه شیل گاز در یک چاه اکتشافی را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است یک روند قابل قبول وجود دارد که نشان می دهد محتوای کانی رسی تابعی از فعالیت پرتو گاما است. اما اطلاعاتی نیز وجود دارند که از این روند تبعیت نمی کنند. این نقاط نشان دهنده شیل گازها است زیرا که محتوای کروژن متغیر آنها منجر به تحرك فعالیت پرتو گاما می شود.

یک پیش بینی دقیق از محتوای رس میزان آلومینیوم  $Al$  است. امروزه ابزار نمودارگیری وجود ندارد که بتواند این پارامتر را اندازه گیری کند. یک روش اندازه گیری اسپکترومتری است که بر اساس یک سری از روابط تجربی، امولسیون  $Al$  را بر اساس مقدار  $Ca$ ،  $Si$  و  $Fe$  در سازند مهیا می کند. روش اسپکترومتری درصد وزنی رس، کربنات، پیریت، کوارتز، فلدسپات و میکا را محاسبه می کند. Elemental Capture Spectroscopy یک نمودار ژئوشیمیایی است که مقدار  $Gd$ ،  $Si$ ،  $Ca$ ،  $Fe$ ،  $Ti$ ،  $S$  را به علاوه دیگر عناصر تعیین می کند. روش اسپکترومتری برای به حداکثر رساندن مزایای این روش، توسعه بیشتری یافته است. کروژن به صورت اولیه از  $CH$  و  $O$ ، عناصری که برای محاسبه کانی شناسی توسط اسپکترومتری به کار برده نمی شوند، تشکیل شده است. بنابراین نمودار ژئوشیمیایی، تخمینی از رس را مهیا می کند که به پارامترهای پتروفیزیکی حساس به محتوای کروژن تکیه نمی کند.

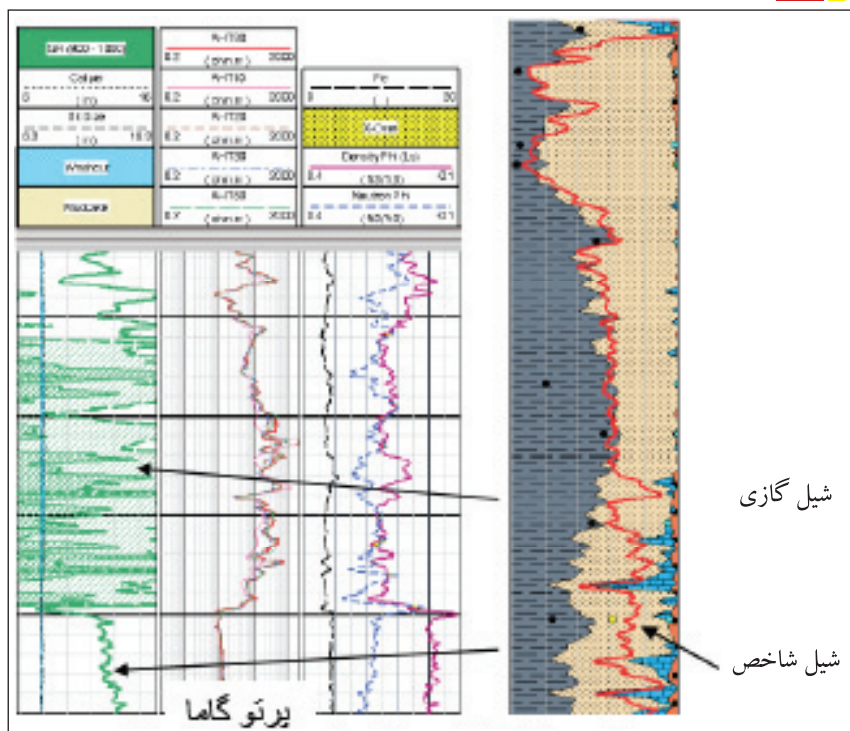
شکل ۳ نمودار اسپکترومتری یک شیل متعارف و یک شیل گاز را نشان می دهد. محتوای کانی رسی توسط XRD از طریق نمونه مغزه جانبی تعیین شده و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته است. فعالیت پرتو گاما (واضح است که پرتو گاما یک تخمین دقیق از محتوای رس در شیل گازها نیست) نیز ترسیم گردیده است. یک ویژگی مشترک برای بسیاری از شیل های گازی این است که محتوای رس شیل گازها در واقع کمتر از شیل های متعارف است. اسپکترومتری همچنین نشان می دهد که برعکس

شیل های متعارف، شیل گازها دارای مقادیر متغیری از پیریت و کربنات هستند.

کروژن می تواند به طور دقیق از طریق ترکیب نمودار Conventional triple combo با نمودار ژئوشیمیایی تعیین شود. این ترکیب همچنین اجازه محاسبه کانی شناسی دقیق، نوع و محتوای کانی رسی و تخمین خصوصیات پتروفیزیکی (تخلخل، اشباع و تراوایی) را می دهد. یک نرم افزار تغییر و تفسیر پتروفیزیکی مانند ELAN می تواند برای حل این مقادیر استفاده شود. مقادیر کانی اسپکترومتری می تواند به راحتی به نرم افزار ELAN وارد گردد (میزان کروژن باید به



شکل ۲ | نمودار متقاطع گاما در مقابل محتوای رس اسپکترومتری



شکل ۳ | نمودار اسپکترومتری و پرتو گامای یک شیل متعارف و یک شیل گازی

تغییر پذیری در این دو پارامتر محاسبه می شود. تصحیح دما در رابطه ۳ تا ۶ آورده شده است. ثابت های C۳ و C۷ در ابتدا برای لایه های زغالی دارای متان ایجاد شدند.

$$P_g = 10^{(C_3 * T_i + C_7 * T_i)} \quad (3)$$

$$P_g = 10^{(C_3 * T_i + C_7 * T_i)} \quad (4)$$

$$c4 = \log V_l + (c3 * T_i) \quad (5)$$

$$c8 = \log P_l + (-c7 * T_i) \quad (6)$$

Vlt: حجم Langmuir در دمای مخزن (scf/ton)

Plt: فشار Langmuir در دمای مخزن (psia)

$$C3: 0.027/0$$

$$C7: 0.05/0$$

T: دمای مخزن (degC)

Ti: دمای ایزوترم (degC)

از آنجایی که گاز تنها می تواند جذب کروژن شود، تصحیح برای TOC نیز لازم است. رابطه خطی ساده در فرمول ۷ به طور مناسب و صریح این اثر را اثبات کرده است.

$$V_g = V_g + \frac{TOC_{ker}}{TOC_{m}} \quad (7)$$

تنها یک ایزوترم Langmuir لازم است تا به طور مناسب یک شیل گاز را در یک میدان یا زیر حوضه توصیف کند.

$$G = \frac{V_l P}{(P + P_l)} \quad (2)$$

G: محتوای گاز (scf/ton)

P: فشار مخزن (psia)

Vl: حجم Langmuir (scf/ton)

Pl: فشار Langmuir (psia)

بررسی این معادله نشان می دهد که مقادیر حجم و دمای Langmuir و فشار مخزن مورد نیاز است. به عنوان نمونه، شکل ۵ تعادل بین گاز آزاد و جذب شده را نشان می دهد. در این شکل خط منحنی تعادل بین گاز آزاد و جذب شده به صورت تابعی از فشار مخزن در دمای ایزوترم مشخص گردیده است. شکل این منحنی توسط حجم Langmuir (حجم گاز جذب شده در فشار بینهایت) و فشار Langmuir (فشاری که نیمی از گاز در فشار بینهایت جذب شده است) تعریف می شود.

ایزوترم Langmuir در TOC و دمای خاص اندازه گیری می شود. استفاده از ارزیابی نمودار باید شامل تصحیحاتی باشد که برای

نمی دهد. دانسیته ماتریکس به دست آمده از اطلاعات ژئوشیمیایی بسیار بالا است زیرا این اندازه گیری ها به عناصر موجود در کروژن غیر حساس است.

نمودارهای ژئوشیمیایی تولیدی اولیه در چاه با سیستم تکمیل باز (بدون لوله جداری) مقادیر C و O را نیز اندازه گیری می کردند. این امکان فراهم بود که کروژن مستقیماً با استفاده از میزان غلظت عناصر اضافی اندازه گیری شود. با این وجود، این ابزارها امروزه مورد استفاده قرار نمی گیرند.

پس از این که حجم کروژن تخمین زده شد، مرحله بعد محاسبه حجم گاز جذب شده است. ابتدا حجم کروژن باید به TOC تبدیل شود. این تبدیل در رابطه ۱ آورده شده است. مقدار TOC برای دیگر عناصری که ممکن است در کروژن حضور داشته باشند (N، O، H و S) محاسبه نمی شود. بنابراین یک ضریب تبدیل لازم است که عناصر غایب و نوع کروژن و بلوغ آن را به حساب آورد. به طور کلی ۲/۱ مقدار قابل قبولی برای ضریب تبدیل است.

$$TOC = \frac{\Phi_{ker} \times \rho_{ker}}{\rho_b \times k} \quad (1)$$

TOC: کربن آلی کل (lb/lb)

Φker: حجم کروژن (vol/vol)

ρker: دانسیته کروژن (g/cm³)

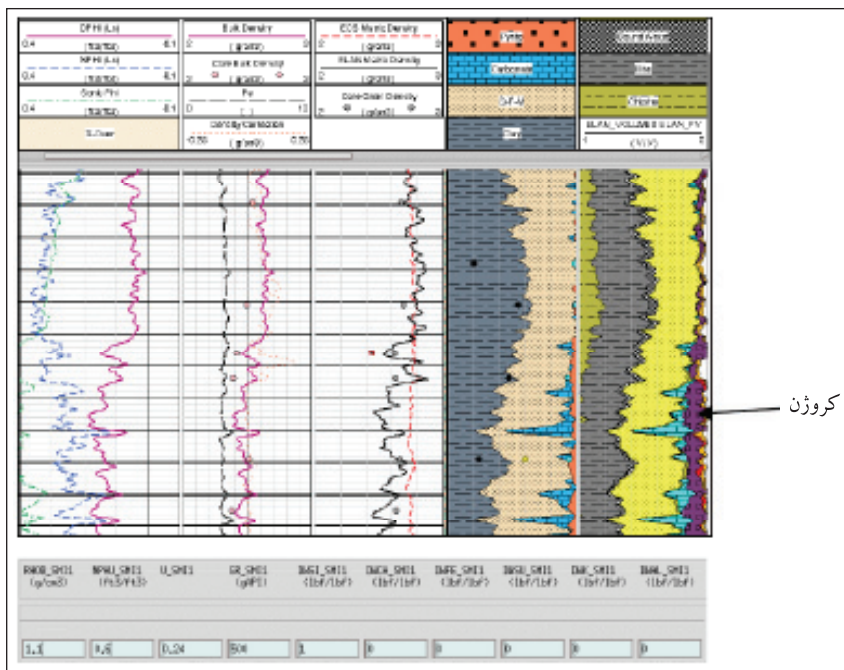
ρb: دانسیته کل (g/cm³)

k: فاکتور تبدیل کروژن

ستون ۲ از شکل ۶، TOC محاسبه شده از نمودار را با مغزه مقایسه می کند.

### ۳ - ارزیابی گاز جذب شده

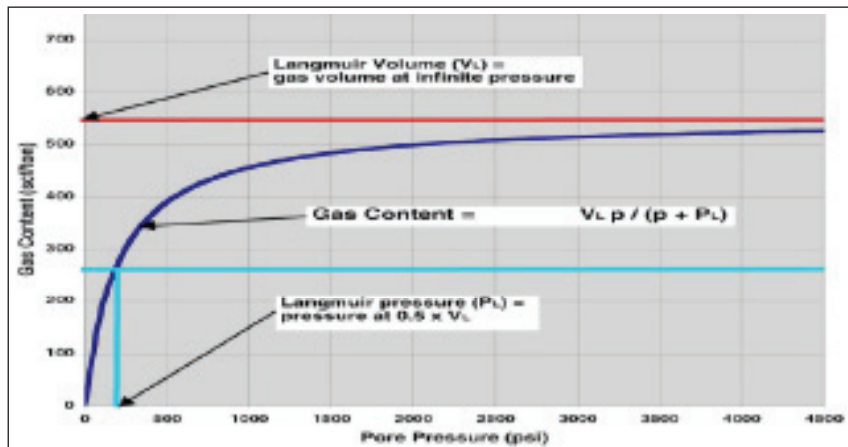
گاز جذب شده، متان جذب شده در سطح کروژن، با متان موجود در فاز گازی در حالت تعادل است. خط هم دمای Langmuir برای توصیف این نوع تعادل در دمای خاص توسعه یافته است (معادله ۲). ایزوترم های پیچیده تر برای مشخص کردن این تعادل محاسبه شده اند، اما Langmuir بر اساس استانداردهای صنعت نفت، اندازه گیری دقیقی را انجام می دهد. آنالیزهای مغزه برای دستیابی به ایزوترم Langmuir لازم است. با این وجود، معمولاً



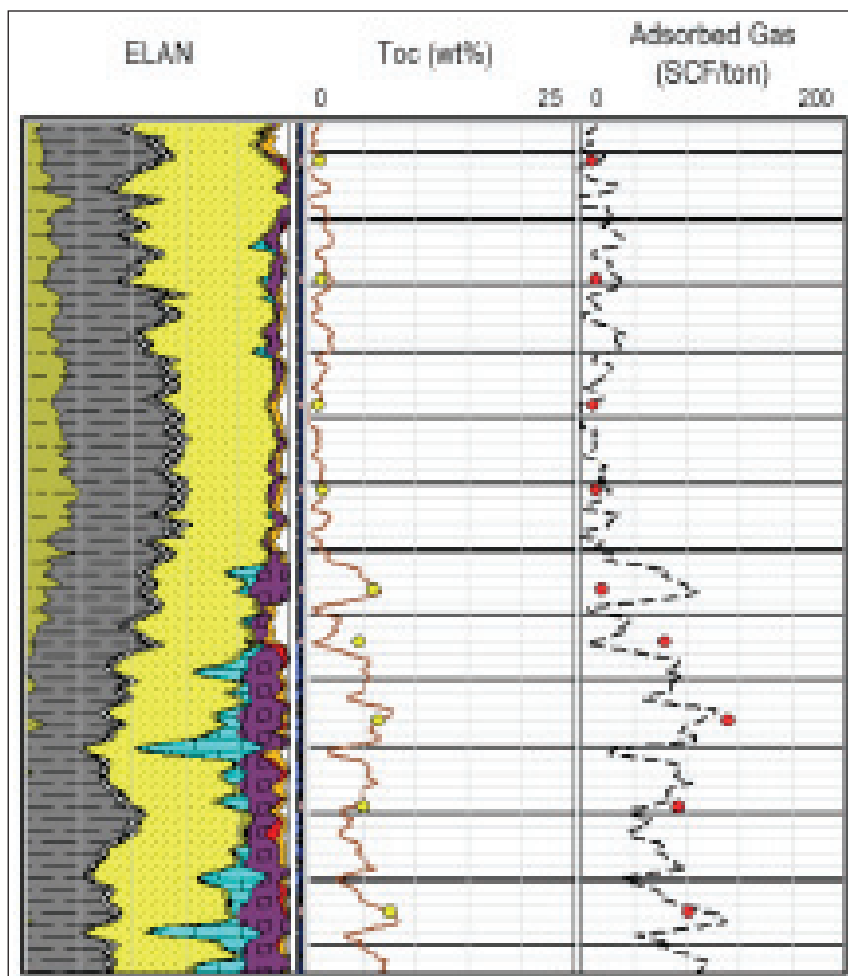
شکل ۴ | آنالیز نمودار متعارف اسپکترولیت و تفسیر ELAN از شیل متعارف و شیل گاز



مهم می‌تواند از این شکل تشخیص داده شوند: در فشارهای پایین موثرتر است در حالی که جذب سطحی بر روی گاز از میزان ذخیره گاز حجم گاز آزاد، مقدار بیشتری از گاز را در



شکل ۵ | ایزوترم Langmuir



شکل ۶ | نمودار اسپکترولیت، TOC و گاز جذب شده مربوط به شیل متعارف و شیل گاز

$V_L$ : حجم Langmuir تصحیح شده برای TOC در دمای مخزن (scf/ton)  
TOCiso: کربن آلی کل از ایزوترم (%wt)

TOClg: کربن آلی کل از لاگ (%wt) از ترکیب معادلات فوق رابطه ایزوترم Langmuir بدست می‌آید که برای محاسبه گاز جذب شده به کار می‌رود (معادله ۸).

$$GC = \frac{V_L P}{(P + P_L)} \quad (8)$$

ستون ۳ از شکل ۶ نمودار گاز جذب شده محاسبه شده از معادله ۸ را نشان می‌دهد که با نمونه مغزه مقایسه شده است. نقاط مغزه، آنالیزهای Canister Desorption را نشان می‌دهند. در این نوع آنالیز، یک نمونه بازیابی شده از مغزه، در یک محفظه آب‌بندی شده قرار می‌گیرد و میزان گاز جذب شده در هنگام گرم شدن نمونه در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود. تصحیح برای محاسبه گاز گم شده که همان گاز آزاد شده قبل از جداسازی و عایق‌سازی نمونه است، ضروری است. این نوع آنالیز برای تشخیص شیل گاز به اندازه ایزوترم Langmuir مفید نیست زیرا که امکان خطا در محاسبه گاز گم شده وجود دارد و تفکیک گاز آزاد از گاز جذب شده امکان‌پذیر نیست. ایزوترم Langmuir، آنالیز مناسب‌تری است که تحت تاثیر خطاهای موجود در تخمین گاز گم شده قرار نمی‌گیرد. از آنجایی که این آنالیز داده‌های لازم جهت محاسبه گاز جذب شده را مهیا می‌کند، حجم Langmuir، فشار Langmuir، دما، فشار و TOC این آزمایش پتانسیل گاز را اندازه‌گیری نمی‌کند. ضعف اصلی ایزوترم Langmuir این است که مقدار گازی را که شیل می‌تواند نگه دارد، اندازه‌گیری می‌کند؛ بنابراین اگر شیل از گاز تهی شده باشد حجم گاز را بیش از معمول برآورد می‌کند.

#### ۴ - ارزیابی گاز آزاد

شکل ۷ محتوای گاز (جذب شده، آزاد و کل) را در مقابل فشار برای شیل گاز نشان داده شده در نمودار نمایش می‌دهد. چندین ویژگی

گاز باعث کاهش ریسک اقتصادی توسعه چنین مخازنی گردیده است و با توجه به روند کنونی افزایش تقاضای انرژی، به غیر از آمریکا، بسیاری کشورها از جمله چین، هند، لهستان، رومانی و آرژانتین به طور جدی برنامه توسعه این نوع ذخایر را در دست اقدام دارند. توجه شرکت‌های بزرگ نفتی به این منابع نامتعارف نیز افزایش چشمگیری یافته است و آنها به دنبال دستیابی به این منابع در نقاط مختلف دنیا و متنوع نمودن پورتفولیوی خود هستند. به عنوان مثال شرکت Total فعلاً به دنبال حضور در بازار شیل گاز ایالات متحده از طریق سرمایه‌گذاری مشترک است.

پارامترهای اصلی برای اینکه یک مخزن به عنوان شیل گاز در نظر گرفته شود عبارتند از:

- میزان کل محتویات کربنی (TOC)
- بزرگتر از ۲ درصد وزنی (بعضی منابع ۴ درصد

شده و کل را به  $scf/ton$  نشان می‌دهد. علاوه بر میزان گاز درجا برای هر دو گاز جذب شده و کل گاز بر حسب  $BCF/section$  محاسبه شده است. این مقادیر پتانسیل نهایی مخازن شیل گاز را مشخص می‌کند و امکان محاسبات راندمان بازیابی را میسر می‌سازد.

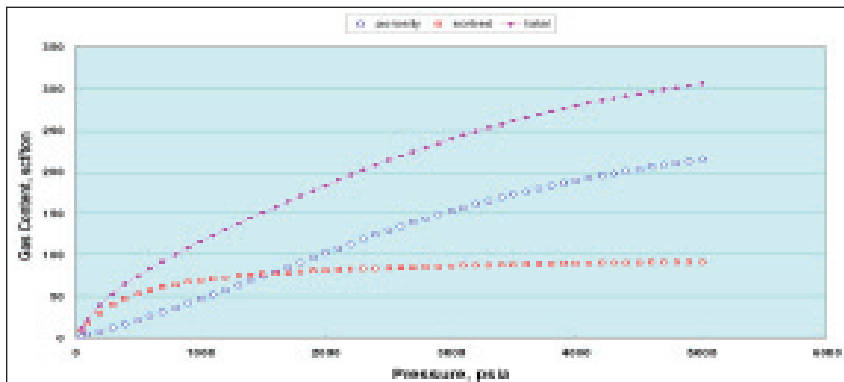
ابزارهای نمودارگیری ژئوشیمیایی در چاه‌های دارای لوله جداری نیز کارآیی دارند. ترکیب نمودارها در چاه‌های با سیستم تکمیل باز (بدون لوله جداری) با نمودارهای ژئوشیمیایی در چاه‌های دارای لوله جداری، ارزیابی صدها چاه تولیدی که در مخازن شیل گاز حفاری شده‌اند را امکان‌پذیر می‌کند.

### نتیجه‌گیری

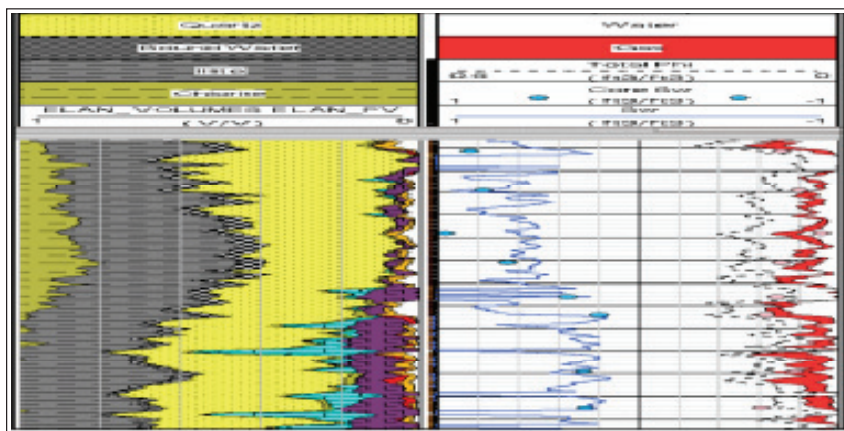
توجه به گاز به عنوان سوخت پاک و حجم بالای ذخایر شیل‌های گازی و افزایش قیمت

فشارهای بالاتر نشان می‌دهد. درصد گاز آزاد در شیل گاز مقادیری در حدود ۱۵ تا ۸۰٪ را نشان می‌دهد که به فشار مخزن، تخلخل و اشباع گاز بستگی دارد. بنابراین تعیین میزان گاز آزاد نیز برای تشخیص شیل گاز لازم است. تخلخل کل و موثر و اشباع گاز می‌تواند با استفاده از یک نرم‌افزار تفسیر پتروفیزیکی مانند ELAN، برای شیل گازها محاسبه گردد. در این خصوص، ضروری است که علاوه بر میزان گاز جذب شده، میزان دقیق محتوای کانی رسی نیز مشخص باشد.

جذب سطحی یک روش بسیار موثر از ذخیره گاز در فشار پایین است. با این وجود، با افزایش فشار، حداکثر گاز را نشان می‌دهد. برای محاسبه دقیق اشباع برای شیل گاز، تخمین شوری آب به تله افتاده و آب همراه مهم است. نمونه‌های آب در شیل گازها بسیار اندک هستند زیرا بسیاری از شیل گازها عموماً دارای اشباع آب کاهش نیافتنی هستند. بنابراین، کالیبراسیون آنالیز مغزه معمولاً بهترین وسیله برای تخمین شوری است. شکل ۸ نمودارهای اشباع آب و تخلخل کل و موثر به دست آمده از ELAN را برای شیل گاز و شیل متعارف نشان می‌دهد. نتایج مغزه نیز در این شکل نشان داده شده است. فرمول‌هایی برای تبدیل تخلخل موثر، اشباع گاز، گراویته گاز، فشار و دمای سازند به میزان گاز در شرایط استاندارد سطح وجود دارد. به منظور تسهیل مقایسه بین گاز آزاد و جذب شده، گاز آزاد با استفاده از رابطه ۹ به  $scf/ton$  تبدیل می‌شود.



شکل ۷ | محتوای گاز در مقابل فشار برای شیل گاز.



شکل ۸ | نمایش نمودار مقادیر ELAN و گاز آزاد برای شیل متعارف و شیل گاز

$$G_{cfm} = \frac{1}{B_g} * (\phi_{eff} * (1 - S_w)) * \frac{\psi}{P_b} \quad (9)$$

G c f m

حجم گاز آزاد (scf/ton)

Bg: ضریب حجمی سازند گاز

(reservoir cf/scf)

$\phi_{eff}$ : تخلخل موثر (vol/vol)

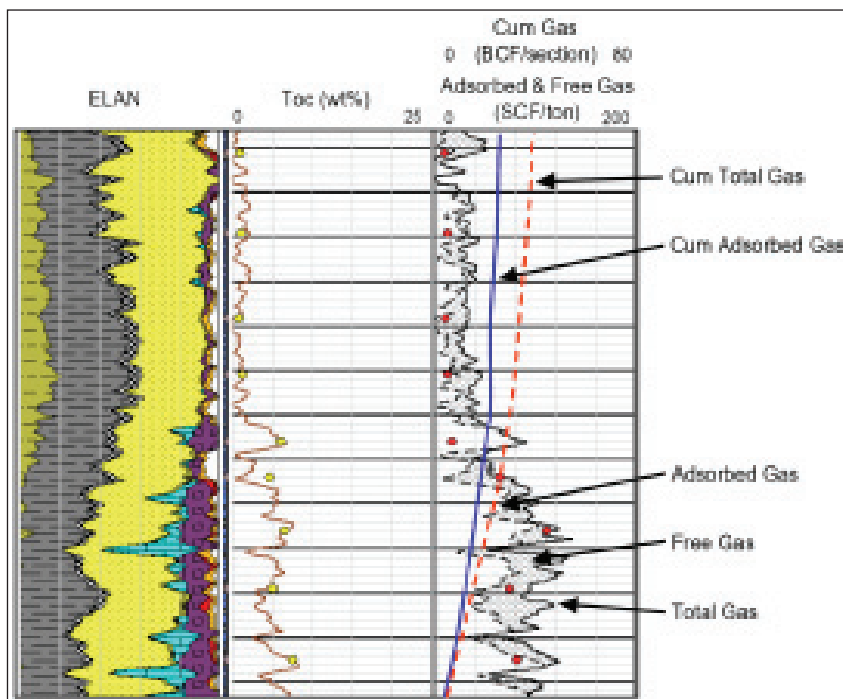
S<sub>w</sub>: اشباع آب (vol/vol)

p<sub>b</sub>: دانسیته کل (g/cm<sup>3</sup>)

$\psi$ : ثابت تبدیل (۱۰۵۲/۳۲)

شکل ۹ میزان کل گاز را برای شیل متعارف

و شیل گاز نشان می‌دهد. ستون ۳ گاز جذب



شکل ۹ | میزان کل گاز برای شیل متعارف و شیل گاز

Gamma Ray, Density, Resistivity,  
(Sonic)

• وجود نشانه‌های گاز<sup>۱۲</sup> در چاه‌های حفاری شده

نمودارهای ژئوشیمیایی ابزار مناسبی برای ارزیابی دقیق میزان کانی‌های رسی، مستقل از کروژن شیل‌های گازی به‌شمار می‌روند. اندازه‌گیری ایزوترم Langmuir که با آنالیز مغزه بدست می‌آید، برای ارزیابی توان تولید شیل‌گاز ضروری است؛ اما وجود این نوع اطلاعات تنها یک چاه برای ارزیابی یک میدان و یا حوضه رسوبی کفایت می‌کند.

پارامتر مهم دیگر در ارزیابی پتانسیل شیل‌گاز بودن یک مخزن، آگاهی از میزان بازیابی<sup>۱۳</sup> است. لازم به ذکر است که ضریب بازیابی از این نوع مخازن از ۸ درصد تا ۲۰ درصد به ازای هر حلقه چاه حفاری شده است.

که نشانگر وجود شیل در پنجره گازی است.

- وجود میزان بالای کانی‌های غیر رسی
- وسعت زیاد بلوک و میدان مورد مطالعه (بالای ۱۰۰ کیلومتر مربع)
- دور بودن از مناطق شهر
- دارا بودن نمودارهای پتروفیزیکی

(وزنی)

• ضخامت بالای لایه‌های شیلی (۴۰ متر

و بیشتر)

• عمق بالای مخزن (۱۰۰۰ تا ۳۵۰۰ متر)

• فشار بالا<sup>۱۱</sup>

• انعکاس ویتربینایت<sup>۱۱</sup> محدود در حد ۳٪

#### پانویس‌ها

<sup>1</sup> reasghari@yahoo.com

<sup>2</sup> Fahimeh.shokraneh@gmail.com

<sup>3</sup> kolahdouza@gmail.com

<sup>4</sup> TOC

<sup>5</sup> Adsorption Fraction

<sup>6</sup> ECS

<sup>7</sup> Transgressive Systems Tract, TST

<sup>8</sup> Brittle

<sup>9</sup> ECS

<sup>10</sup> Overpressured Zone

<sup>11</sup> Vitrinite Reflectance

<sup>12</sup> Gas Show

<sup>13</sup> Estimated Ultimate Recovery, EUR

#### منابع

- [1] Bergen F., Zijp M., Nelskamp S., Evaluation of the potential of shale gas in the Netherlands, Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU2011-7793-1, 2011.
- [2] B.S. Hart, ConocoPhillips, Shale- gas Production and Sequence Stratigraphy: What Makes the Best Part of the Best Plays, Energy environment economy, 2011 CSPG CSEG CWLS Convention.
- [3] Lewis R., Ingraham D., Percy M., New Evaluation Techniques for Gas Shale Reservoirs, Schlumberger, Reservoir Symposium 2004.

- [4] Liming Q., Zhihuan Z., Yuyuan W., Rujin F., Ling Z., 2010, Organic Geochemical and Fluid Inclusion Evidence for Filling Stages of Natural Gas and Bitumen in Volcanic Reservoir of Changling Faulted Depression, Southeastern Songliao Basin, Journal of Earth Science, Vol. 21, No. 3, p. 303-320, June 2010.
- [5] Suhas C Talukdar, WEATHERFORD Laboratories, Baseline Resolution, Application of Geochemistry for Shale Gas Assessment.